# Laboratório de Estrutura da Matéria I

## Radiação térmica

### PRINCÍPIO E OBJETIVOS

A lei da radiação térmica de Planck, que descreve a distribuição de energia irradiada por um corpo negro em função do comprimento de onda e da temperatura, e a lei de Stefan-Boltzmann, que relaciona a energia por unidade de tempo e por unidade de área irradiada por um corpo à quarta potência de sua temperatura absoluta, são verificadas experimentalmente para um filamento de lâmpada incandescente.

### TÓPICOS RELACIONADOS

Radiação térmica, radiação de corpo negro, distribuição de Planck, lei do deslocamento de Wien, lei de Stefan-Boltzmann, emissão e absorção de radiação, efeitos termoelétricos, variação da resistividade elétrica com a temperatura, dispersão em um prisma.

### EQUIPAMENTO

Lâmpada incandescente, espectrômetro Zeiss, prisma (de vidro "flint"), detector de radiação infravermelha e visível, filtro infravermelho, potenciômetro multivoltas, termopilha de Moll, fonte de tensão, amplificador universal de medição, multímetros digitais, resistores, cabos, conectores, trilho, suportes.

### TAREFAS EXPERIMENTAIS

*Distribuição espectral da radiação térmica*

1. Calibrar o potenciômetro multivoltas utilizado nas medidas de ângulos de desvio no espectrômetro Zeiss.
2. Levantar a distribuição espectral da energia irradiada por uma lâmpada incandescente a diferentes temperaturas usando o espectrômetro Zeiss operando com prisma.

*Lei de Stefan-Boltzmann*

3. Medir a resistência elétrica do filamento de tungstênio da lâmpada incandescente à temperatura ambiente e obter por extrapolação seu valor a 0ºC.
4. Medir a potência irradiada pela lâmpada sobre a termopilha para diferentes valores de tensão/corrente através do filamento.
5. Assumindo um comportamento polinomial de segundo grau para a resistência elétrica do filamento em função da temperatura, verificar a lei de Stefan-Boltzmann.

# PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

## AULA 01:

*Distribuição espectral da radiação térmica*:

Calibração do potenciômetro multivoltas:

1. Utiliza-se nesta etapa o espectrômetro Zeiss, já descrito em uma prática anterior. O espectrômetro encontra-se esquematizado na Fig. 1, sendo um prisma posicionado sobre a plataforma para dispersar a luz emitida pela lâmpada incandescente a ser analisada.

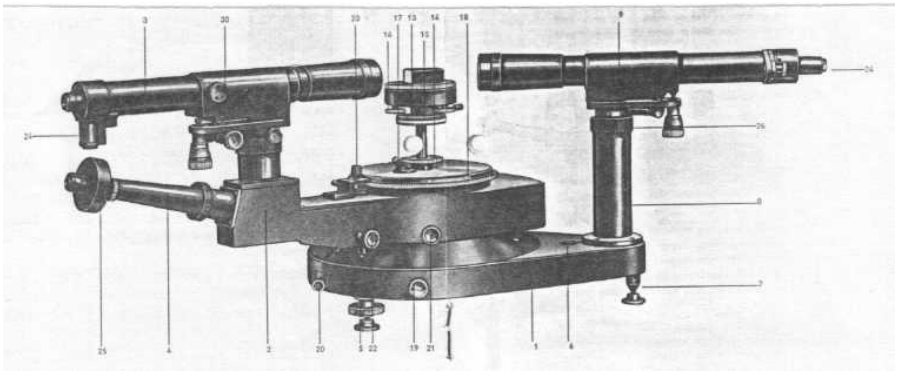

Fig. 1: Espectrômetro Zeiss.

2. O ângulo de giro do braço móvel do espectrômetro é medido indiretamente com auxílio de um potenciômetro multivoltas a ele acoplado através de um sistema mecânico feito de discos, polias e fio. Procure entender o funcionamento do sistema. O potenciômetro fornece uma resistência elétrica variável ($R_{pot}$) que é relacionada (de uma forma aproximadamente linear) ao ângulo de giro do braço móvel.
3. Para proceder à calibração do potenciômetro (ou seja, determinar a relação entre a resistência elétrica e o ângulo de giro), posicione inicialmente o braço móvel na posição não desviada e efetue o alinhamento do espectrômetro (procedimento já descrito em uma prática anterior).
4. Meça com um multímetro digital a resistência elétrica correspondente ao ângulo de leitura 0º0'0".
5. Gire agora o braço móvel e registre as leituras de ângulo e de resistência elétrica a cada 5º aproximadamente, cobrindo a faixa até 90º e sempre mantendo o sentido de rotação do braço móvel (inclusive nos ajustes finos de rotação!).
6. Observe em qual lado foi feito o processo de calibração para posteriormente realizar as medidas sempre deste mesmo lado.
7. Retorne o espectrômetro para a posição 0º e repita as medidas acima mais duas vezes, procurando reproduzir os mesmos ângulos. Com esses três conjuntos de dados será levantada a curva de calibração do potenciômetro multivoltas e será avaliada a incerteza nas leituras indiretas de ângulos de giro.

8. Para que as leituras de resistência elétrica ($R_{pot}$) e ângulo de giro sejam reprodutíveis, é essencial que o movimento do braço móvel sempre ocorra de forma solidária ao movimento das polias acopladas ao potenciômetro. Verifique atentamente se o sistema mecânico está funcionando perfeitamente.
9. Ainda para garantir essa reprodutibilidade, procure registrar sempre as leituras mantendo o sentido de rotação do sistema e evitando que seja atingido o fim de curso do potenciômetro.
10. Caso ocorra qualquer folga ou atraso entre o movimento do braço móvel e a rotação do eixo do potenciômetro (o que sempre ocorre no fim de curso do potenciômetro), será necessário repetir completamente o procedimento de calibração.

Medida da intensidade da radiação emitida pela lâmpada incandescente:

11. Conecte a lâmpada incandescente à fonte de alimentação montando um circuito que permita as medidas de tensão ($V_{lamp}$) e corrente ($I_{lamp}$) na lâmpada. Inicie com uma tensão de aproximadamente 2-3 V.
12. Posicione a lâmpada diante da fenda de entrada no colimador do espectrômetro Zeiss, de forma que a luz irradiada possa ser observada na ocular o espectrômetro com o braço móvel na posição não desviada (ângulo de giro = 0º). Tome cuidado com a possibilidade de excesso de luz na ocular, o que pode causar incômodo ao observador, reduzindo se necessário a abertura da fenda.
13. Posicione o prisma sobre a plataforma giratória de modo que a luz da lâmpada seja refratada como indicado na Fig. 2. Observe que o braço móvel deve ser girado na visualização dos raios refratados para o mesmo lado utilizado no processo de calibração do potenciômetro multivoltas.

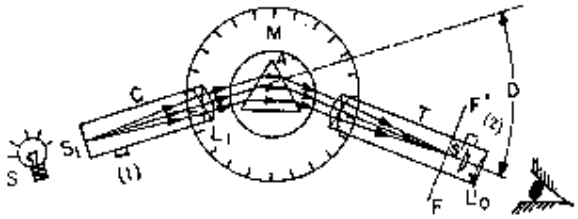


Fig. 2: Arranjo experimental para observação de raios refratados no prisma.

14. Localize os raios refratados com o telescópio de observação. Nessa situação deve ser possível a visualização do espectro contínuo colorido típico de uma fonte de luz branca. Ajuste o foco da lente colimadora para observação nítida dos raios refratados.
15. Gire a plataforma giratória de modo a variar o ângulo de incidência, acompanhando sempre os raios refratados com o telescópio de observação. Há um ponto em que, continuando a girar a plataforma no mesmo sentido, os raios refratados passam a se mover no sentido oposto. Esta é a situação de desvio mínimo..

    Obs.: Para facilitar a localização do ângulo de desvio mínimo, observe nas Figs. 2 e 3 que nessa situação os raios refratados são desviados simetricamente em relação ao vértice **A**.

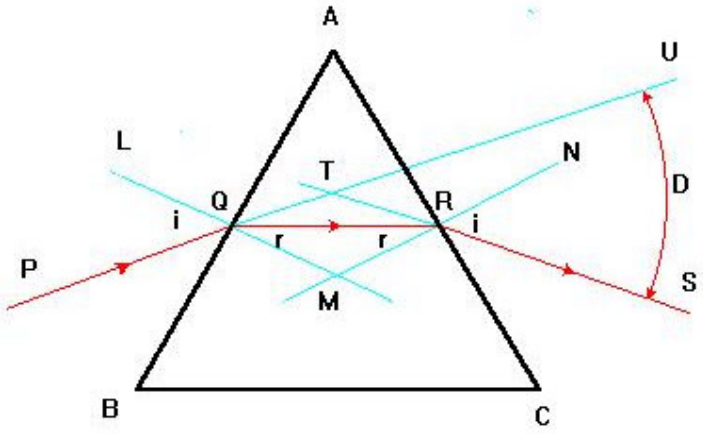


Fig. 3: Trajetória do feixe de luz através do prisma na condição de desvio mínimo ($\delta_m$ = D).

16. Após achar a situação do desvio mínimo para o conjunto de raios refratados, fixe a plataforma giratória e não toque mais no prisma. Acople a seguir o detector de radiação infravermelha e visível, juntamente com o filtro de radiação infravermelha, diante da ocular do espectrômetro.
17. O detector de radiação consiste em uma termopilha feita com 48 junções miniaturizadas, posicionadas na parte escurecida na frente do detector para absorver eficientemente qualquer radiação térmica. As junções de referência são mantidas à temperatura ambiente do invólucro do detector. A faixa espectral de funcionamento do detector é bastante larga, indo desde ultravioleta até o infravermelho distante. Um filtro de radiação infravermelha limita a faixa de operação a comprimentos de onda abaixo de 8000 nm, de modo a evitar a influência da radiação devida objetos nas vizinhanças.
18. Com a plataforma giratória fixa, cubra a lente na entrada do telescópio de observação com um protetor apropriado e ajuste o zero do detector pressionando o botão denominado "TARE" e medindo a tensão de saída (denominada $V_{term}$) com um voltímetro digital.
19. Remova o protetor na entrada do telescópio de observação e observe a leitura da tensão de saída do detector na posição aproximada onde foi localizado o espectro contínuo. Ajuste o controle de ganho do detector e o fundo de escala do voltímetro de modo a otimizar a leitura da tensão proporcional à intensidade da radiação detectada. Pode ser conveniente nesse momento aumentar a abertura da fenda na entrada do colimador para permitir incidência de maior quantidade de radiação sobre o prisma.
20. Faça agora uma varredura cuidadosa, girando o braço móvel do espectrômetro desde 0 até aproximadamente 90º e registrando as medidas de resistência elétrica do potenciômetro ($R_{pot}$) e de tensão na saída do detector ($V_{term}$). Registre em torno de 30-50 pontos, especialmente na região onde ocorrem as maiores variações de intensidade de radiação.

21. Lembre-se de observar os valores de tensão ($V_{lamp}$) e corrente ($I_{lamp}$) na lâmpada, os quais deverão se manter aproximadamente constantes durante o registro completo do espectro. Anote os valores médios desses parâmetros e avalie as suas incertezas a partir das flutuações observadas durante a varredura.
22. Após concluída a varredura, retorne o braço móvel para a posição inicial (ângulo de giro igual a 0º), aumente a tensão na lâmpada, confira a localização do ângulo de desvio mínimo, ajuste novamente o zero do detector e registre um novo espectro. Faça isso para tensões aplicadas na lâmpada variando até 6 V.

**AULA 02:**

*Lei de Stefan-Boltzmann*:

Medida da potência irradiada pela lâmpada sobre a termopilha:

23. O arranjo experimental encontra-se esquematizado na Fig. 4. A lâmpada incandescente deve ser conectada à fonte de tensão na saída AC. A corrente através do filamento ($I_{lamp}$) é medida com um amperímetro em série com a lâmpada, enquanto que a tensão nos terminais da lâmpada ($V_{lamp}$, com valor máximo de 8 V) é medida com um voltímetro em paralelo com esta.
24. A potência irradiada pela lâmpada é medida com auxílio de uma termopilha. A termopilha de Moll funciona como sensor de radiação em uma larga faixa espectral, com sensibilidade aproximadamente constante para comprimentos de onda entre 150 nm e 15 μm. Um esquema do funcionamento da termopilha utilizada neste experimento está ilustrado na Fig. 5. A área escurecida (com alta capacidade de absorção de radiação) possui vários termopares conectados em série, enquanto as junções de comparação são termicamente incrustadas no corpo da termopilha. O refletor cônico permite uma ampliação da área efetiva do detector iluminada pela radiação que se deseja examinar.

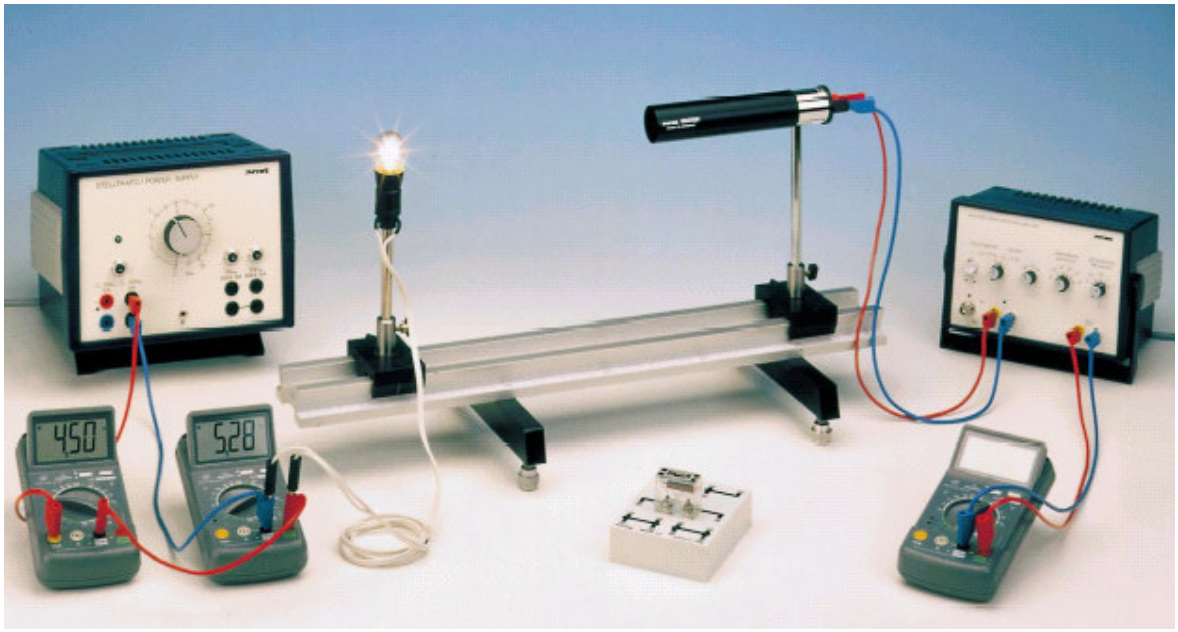


Fig. 4: Arranjo experimental para verificação da lei de Stefan-Boltzmann.

25. Posicione a termopilha a uma distância a aproximadamente 30 cm da lâmpada. Os terminais da termopilha devem ser conectados à entrada do amplificador universal de medição, o qual deve ser selecionado na opção "Low Drift" (resistência de entrada de $10^4$ Ω). O fator de amplificação deve ser igual $10^2$ ou $10^3$ e a constante de tempo (característica de um filtro passa-baixas) igual a 1s.

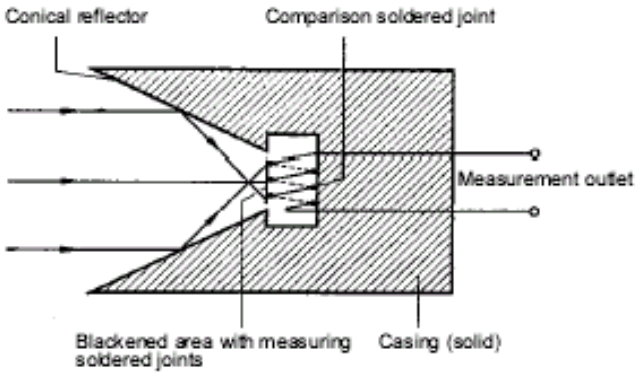


Fig. 5: Esquema do funcionamento da termopilha de Moll (seção longitudinal).

26. Com a lâmpada acesa com uma tensão intermediária (da ordem de 2-3 V), ajuste o alinhamento da termopilha em relação ao filamento. Inicialmente posicione a lâmpada de modo que o eixo do filamento incandescente (com formato aproximadamente cilíndrico) esteja perpendicular ao trilho ótico. Gire a seguir a termopilha (através da haste cilíndrica) para um lado e para o outro até que um sinal máximo seja detectado no voltímetro ligado à saída do amplificador de medição.
27. Antes de ser efetuada qualquer medida, é necessário eliminar ou reduzir ao máximo o sinal de fundo ("background") detectado pela termopilha e medido no voltímetro conectado à saída do amplificador de medição. Esse background é devido à radiação ambiente (excluída a lâmpada) e possíveis ruídos introduzidos pelo sistema de amplificação. Para isso, apague a lâmpada e retire-a (com suporte) do trilho. Observe então o sinal medido no voltímetro conectado à saída do amplificador e ajuste o controle de zero do amplificador de forma a anular tal sinal. Se eventualmente o fator de amplificação ou a constante de tempo forem alterados durante a experiência, será necessário refazer esse ajuste.
28. Após a lâmpada ter sido reposicionada sobre o trilho, a leitura de tensão ($V_{term}$) no voltímetro conectado à saída do amplificador de medição, a qual é proporcional à potência irradiada sobre a termopilha, pode ser efetuada sempre que a termopilha tenha atingido o equilíbrio (quando são obtidos valores estáveis de $V_{term}$), o que demanda cerca de um minuto. Deve-se tomar cuidado ao efetuar as medidas para evitar ao máximo a presença de radiação de fundo.
29. Varie progressivamente a tensão aplicada à lâmpada ($V_{lamp}$), registrando os valores dessa tensão, da corrente que passa pela lâmpada ($I_{lamp}$) e da tensão na saída do amplificador ($V_{term}$). Efetue em torno de 10 a 15 medidas entre 2 e 8 V de tensão aplicada à lâmpada. Para tensões acima de 6 V, tome o

cuidado de não permitir que a lâmpada fique acesa por muitos minutos, de modo a prolongar sua vida útil.

30. Retorne a tensão sobre a lâmpada para o valor nulo, aguarde a lâmpada retornar à temperatura ambiente, remova a lâmpada do trilho, verifique novamente o sinal de fundo e repita as medidas acima mais duas vezes (você terá portanto três conjuntos de medidas para possibilitar a determinação posterior de valores médios e incertezas).

Medida da resistência elétrica da lâmpada à temperatura ambiente:

31. Monte o circuito esquematizado na Fig. 6, onde o resistor de 100 Ω é conectado em série com a lâmpada para permitir um ajuste fino da corrente no circuito, além de limitar a corrente máxima através da lâmpada.
32. Meça a corrente e tensão indicadas nos multímetros para corrente entre 0 e 200 mA, valores que são suficientemente pequenos para evitar aquecimento apreciável do filamento da lâmpada. Efetue cerca de dez medidas no intervalo indicado.
33. Repita as medidas acima mais duas vezes, sempre desligando a tensão sobre a lâmpada e reiniciando a série de medidas.
34. Meça a resistência da lâmpada (fria) diretamente com um ohmímetro para posterior comparação.
35. Observe a temperatura ambiente no laboratório em um termômetro e anote o seu valor.

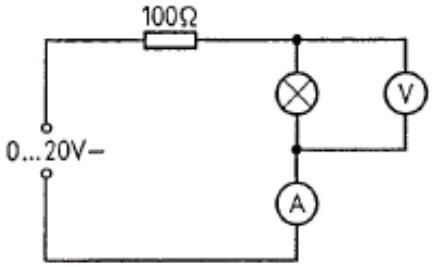


Fig. 6: Circuito utilizado para determinação da resistência elétrica da lâmpada à temperatura ambiente.

## CUIDADOS QUE DEVEM SER TOMADOS EM LABORATÓRIO

1. O espectrômetro Zeiss é um equipamento delicado e preciso, cujo manuseio requer *atenção e cuidado* para evitar danos ao equipamento e prejuízo na qualidade das medidas efetuadas.
2. Igual cuidado deve ser tomado ao se manipular o prisma e os detectores de radiação, que são frágeis e não podem *em hipótese alguma* sofrer impactos. Jamais toque nas superfícies do prisma com as mãos; utilize um lenço de papel para evitar o contato com essas superfícies.
3. Tome cuidado ao observar a radiação emitida pela lâmpada incandescente através da ocular do espectrômetro, pois o excesso de radiação pode causar incômodos aos olhos do observador.

4. Não permita jamais que a tensão aplicada à lâmpada ultrapasse 8 V. Como a tensão nominal de trabalho da lâmpada é de 6 V, evite que a lâmpada permaneça acesa por muito tempo para valores de tensão entre 6 e 8 V .
5. As medidas efetuadas com os detectores de radiação do tipo termopilha são bastante sensíveis a alterações na temperatura ambiente, de modo que é conveniente mantê-los afastados de correntes de ar (principalmente provenientes de condicionadores de ar). Pelo mesmo motivo, não toque o invólucro da termopilha, utilizando sempre a haste cilíndrica para manuseá-la.
6. Lembre-se que qualquer objeto dentro da área de iluminação da termopilha e que esteja mais quente ou mais frio que ela pode influenciar na medida de $V_{term}$. Evite assim a presença de qualquer fonte de calor (inclusive partes do corpo humano) nas vizinhanças do tubo acoplado à termopilha
7. Aguarde sempre alguns minutos para permitir a termopilha atingir o equilíbrio térmico após ser irradiada, de modo que possam ser obtidos valores estáveis e confiáveis de tensão.
8. Repita periodicamente o ajuste de zero do sinal registrado pela termopilha.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. A radiância espectral $R_T(\lambda)$, definida de forma que $R_T(\lambda)d\lambda$ represente a energia emitida por unidade de tempo e unidade de área por um corpo negro no intervalo de comprimento de onda de $\lambda$ a $\lambda + d\lambda$, é descrita em função da temperatura absoluta $T$ do corpo negro através da famosa lei da radiação térmica de Planck:

$$R_T(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}, \tag{1}$$

onde $c$ é a velocidade da luz, $h$ é a constante de Planck e $k$ é a constante de Boltzmann.

2. Integrando a expressão acima para todos os comprimentos de onda, encontra-se a energia total por unidade de tempo e unidade de área emitida pelo corpo negro, denominada radiância $R_T$, a qual é dada pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$R_T = \sigma T^4, \tag{2}$$

onde $\sigma = 2\pi^5 k^4 / 15 h^3 c^2$ é a constante de Stefan-Boltzmann.

3. Também decorre da lei da radiação térmica de Planck o fato de que o espectro de radiação térmica emitido por um corpo negro desloca-se para freqüências mais altas (ou comprimentos de onda mais curtos) à medida que a temperatura do corpo é elevada, um resultado conhecido como lei do deslocamento de Wien:

$$\lambda_{max} \times T = 0{,}2898 \text{ cm} \cdot \text{K}, \tag{3}$$

onde $\lambda_{max}$ representa o valor do comprimento de onda para o qual a radiância espectral atinge seu valor máximo para uma dada temperatura.

4. A proporcionalidade entre $R_T$ e $T^4$ (que constitui a essência da lei de Stefan-Boltzmann) se mantém válida para um corpo não negro cuja superfície apresente um coeficiente de absorção independente do comprimento de onda e da temperatura (denominado "corpo cinza"), sendo que nesse caso a relação de proporcionalidade passa a ser escrita como:

$$R_T = \varepsilon \sigma T^4, \tag{4}$$

onde $\varepsilon$ representa a *emissividade* do corpo, um parâmetro que varia entre 0 e 1 e que caracteriza a capacidade de emissão e absorção de radiação do corpo considerado ($\varepsilon = 1$ para um corpo negro ideal). Para metais polidos, por exemplo, $\varepsilon \cong 0{,}05$ a temperaturas próximas da ambiente. Para o filamento de tungstênio, $\varepsilon \cong 0{,}35$ na temperatura de trabalho de lâmpadas comuns (em torno de 2800ºC). Para o negro de fumo, $\varepsilon \cong 0{,}95$ à temperatura ambiente (bastante próximo de um corpo negro).

5. Os comprimentos de onda constituintes do espectro de emissão da lâmpada incandescente utilizada nesta prática são determinados utilizando dispersão através de um prisma. O índice de refração $n$ do material que constitui o prisma está relacionado com o ângulo de desvio mínimo $\delta_m$ e com o ângulo de abertura do prisma $A$ pela expressão a seguir:

$$n = \frac{\operatorname{sen}\left(\frac{A + \delta_m}{2}\right)}{\operatorname{sen}\frac{A}{2}} \tag{5}$$

O prisma utilizado nesta prática possui uma base na forma de triângulo eqüilátero, assim $A = 60º$.

6. Como $n$ em geral depende do comprimento de onda $\lambda$ da radiação, então o ângulo de desvio mínimo $\delta_m$ passa a ser também função de $\lambda$: $\delta_m = \delta_m(\lambda)$.

7. A dependência de $n$ em relação a $\lambda$ é usualmente expressa a partir de relações empíricas. No caso de vidros transparentes operando na faixa do visível, a mais conhecida dessas relações é a equação de Cauchy:

$$n(\lambda) = B_1 + \frac{B_2}{\lambda^2}, \tag{6}$$

onde $B_1$ e $B_2$ são constantes determinadas experimentalmente, utilizando uma fonte de luz com componentes monocromáticas de comprimentos de onda conhecidos. Para o prisma utilizado, temos $B_1 = 1{,}689$ e $B_2 = 1{,}390 \times 10^4$ nm$^2$ (veja a ref. 5).

8. A tensão $V_{term}$ detectada pela termopilha é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre a parte escurecida e o corpo da termopilha (ver Fig. 5), sendo esta por sua vez proporcional ao fluxo líquido de radiação através da área exposta da termopilha (ou seja, à diferença entre o fluxo de radiação luminosa incidente sobre a termopilha e o fluxo irradiado por ela). Supondo que tanto o

filamento quanto a área exposta da termopilha se comportem como corpos cinzas, podemos então escrever:

$$V_{term} \propto (T^4 - T_{amb}{}^4), \tag{7}$$

onde $T_{amb}$ representa a temperatura ambiente (em K).

9. Se o termo envolvendo $T_{amb}$ na expressão acima puder ser desprezado em comparação com aquele envolvendo $T$, o que é razoável para as altas temperaturas de operação do filamento, então um gráfico do tipo "di-log" de $V_{term}$ em função de $T$ deverá fornecer uma reta com coeficiente angular igual a 4:

$$\log V_{term} \cong 4 \log T + constante \tag{8}$$

10. A temperatura $T$ do filamento é determinada nesta prática a partir da medida da resistência elétrica $R_{lamp}$ do filamento aquecido (obtida diretamente a partir da relação entre $V_{lamp}$ e $I_{lamp}$) e supondo uma dependência quadrática de $R_{lamp}$ em função de $T$:

$$R_{lamp}(t) = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2), \tag{9}$$

onde $t$ representa a temperatura do filamento em ºC ($t = T - 273$), $R_0$ é a resistência elétrica do filamento à temperatura de 0ºC e $\alpha$ e $\beta$ são constantes características do material, assumindo os valores $\alpha = 4{,}82 \times 10^{-3}$ K$^{-1}$ e $\beta = 6{,}76 \times 10^{-7}$ K$^{-2}$ para o filamento de tungstênio em questão.

## QUESTÕES E CONCEITOS A SEREM PREVIAMENTE COMPREENDIDOS

1. Explique o que você entende por corpo negro. Como se pode "produzir" um corpo negro em laboratório? Dê exemplos de corpos negros "reais".
2. Deduza a lei de Stefan-Boltzmann (Eq. 2) a partir da lei de radiação térmica de Planck (Eq. 1) e calcule o valor numérico da constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma$).
3. Demonstre como a lei do deslocamento de Wien (Eq. 3) pode ser obtida a partir da lei de radiação térmica de Planck (Eq. 1).
4. Esboce a distribuição espectral de energia irradiada por um corpo negro (gráfico de $R_T(\lambda)$ em função de $\lambda$) para várias temperaturas absolutas, indicando graficamente a lei de deslocamento de Wien.
5. Utilize a lei de deslocamento de Wien para determinar numericamente o comprimento de onda onde ocorre o máximo de radiância espectral para os seguintes objetos (com suas respectivas temperaturas médias): corpo humano (36ºC), filamento de lâmpada incandescente (3000 K), superfície do sol (6000 K). Discuta em que faixas do espectro eletromagnético se encontram esses valores de comprimento de onda.
6. Utilize o esquema ilustrado na Fig. 3 para obter a Eq. 5.
7. O crescimento de $R_{lamp}$ em função de $T$ (descrito para o filamento de tungstênio pela Eq. 9) é um comportamento obtido empiricamente ou baseado em alguma lei física fundamental? Ele vale para

todos os materiais? Se não, discuta para quais tipos de materiais o comportamento descrito é verificado. Qual a explicação física para o aumento da resistividade elétrica à medida que a temperatura aumenta nesses materiais?

## PROCEDIMENTOS E CÁLCULOS A SEREM EFETUADOS NO RELATÓRIO

*Calibração do potenciômetro multivoltas*:

1. Organize em uma tabela as medidas de $R_{pot}$ em função do ângulo de giro do braço móvel do espectrômetro. Utilize as diferentes medidas para obter valores médios com incertezas.
2. Faça um gráfico dos valores médios de $R_{pot}$ (com incerteza) em função do ângulo de giro e obtenha a por ajuste polinomial uma relação de calibração que fornece o ângulo de giro em função de $R_{pot}$. Não esqueça de fornecer as incertezas nos coeficientes do ajuste.

*Determinação da resistência elétrica do filamento a 0ºC (*$R_0$*)*:

3. Organize em uma tabela os valores de $V_{lamp}$ e $I_{lamp}$ medidos com a lâmpada "fria" (corrente limitada a 200 mA) . Utilize as diferentes medidas para obter valores médios com incertezas.
4. Faça um gráfico de $V_{lamp}$ em função de $I_{lamp}$ para a lâmpada, incluindo as barras de incerteza.
5. Determine por ajuste linear a resistência elétrica do filamento da lâmpada à temperatura ambiente ($R_{amb}$). Compare com o valor medido diretamente com o ohmímetro em laboratório.
6. Utilize o valor encontrado para $R_{amb}$ para determinar o valor de $R_0$ (resistência elétrica do filamento a 0ºC), através da Eq. 9 e usando o valor medido para a temperatura ambiente.
7. Obtenha a partir da Eq. 9 uma relação que permita determinar a temperatura absoluta *T* do filamento em função da sua resistência elétrica $R_{lamp}$ medida em laboratório (você terá que resolver uma equação do segundo grau).

*Estudo da distribuição espectral da radiação térmica*:

8. Obtenha, a partir de $V_{lamp}$ e $I_{lamp}$ e utilizando a equação obtida no item 7, os valores de temperatura absoluta do filamento (*T*) da lâmpada utilizada nas medidas efetuadas com o espectrômetro.
9. Determine para cada valor de $R_{pot}$ o valor correspondente do ângulo de desvio mínimo ($\delta_m$), utilizando a relação de calibração encontrada no item 2. Não esqueça de fornecer as incertezas nos valores de $\delta_m$.
10. Utilize as Eqs. 5 e 6 para obter os valores de *n* e $\lambda$ para cada valor medido de $R_{pot}$.

    Obs.: Para realizar esses cálculos de obtenção indireta de $\lambda$ a partir de $R_{pot}$ é conveniente utilizar algum software apropriado, como Excel ou Origin.
11. Organize em tabelas os valores medidos de $R_{pot}$, $\delta_m$, *n*, $\lambda$ e $V_{term}$ medidos para cada temperatura *T* do filamento.
12. Monte gráficos de $V_{term}$ em função de $\lambda$ para cada valor de *T*. Discuta as principais características desses gráficos, comparando-os com as previsões da lei da radiação térmica de Planck e da lei de

deslocamento de Wien.

13. Determine os comprimentos de onda em que ocorrem os valores máximos de $V_{term}$ para cada valor de $T$ e calcule os valores dos produtos $\lambda_{max} \times T$, comparando-os com a previsão da lei de deslocamento de Wien.

*Verificação da Lei de Stefan-Boltzmann*:

14. Organize em tabelas os valores de $V_{lamp}$, $I_{lamp}$, $R_{lamp}$, $T$ e $V_{term}$. (Os valores de $T$ deverão ser obtidos a partir de $R_{lamp}$ utilizando a equação obtida no item 7). Apresente inicialmente os três conjuntos de medidas feitos em laboratório e a seguir utilize essas diferentes medidas para obter valores médios com incertezas.
15. Faça um gráfico duplamente logarítmico de $V_{term}$ em função de $T$ (incluindo as barras de incerteza). Você pode optar por utilizar escalas duplamente logarítmicas (como num papel "di-log") ou por colocar no gráfico em escalas lineares os valores de $\log V_{term}$ e $\log T$ (propagando as respectivas incertezas).
16. Determine por ajuste linear o coeficiente angular da reta que melhor se ajusta aos pontos experimentais. Discuta o resultado obtido.
17. Os pontos obtidos no gráfico acima usualmente mostram uma alteração de inclinação à medida que $T$ varia. Determine o coeficiente angular da reta que melhor se ajusta à porção final dos pontos experimentais (obtidos em temperaturas mais altas) e discuta o resultado obtido, comparando-o com o valor esperado de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann.

## DISCUSSÕES ADICIONAIS

1. Discuta as principais fontes de erro envolvidas nesta prática, tais como: uso da Eq. 5 para caracterizar a dispersão do prisma, determinação da temperatura do filamento através da Eq. 9, aproximação envolvida na passagem da Eq. 7 para a Eq. 8, aproximação de emissividade constante para o filamento (desprezando a sua dependência com o comprimento de onda e com a temperatura), etc. Em que essas aproximações influenciaram nos resultados obtidos?
2. Discuta o que seria alterado nesta experiência se o prisma fosse substituído por uma rede de difração (como feito em uma prática anterior), enumerando as vantagens e desvantagens dos métodos de espectroscopia com prisma e com rede de difração no que diz respeito às medidas realizadas.
3. Em sua opinião, os resultados obtidos nesta prática são conclusivos para a verificação da lei de Stefan-Boltzmann (dependência da radiância com a quarta potência da temperatura absoluta)? Discuta, com base nos gráficos traçados e nos valores encontrados para os coeficientes angulares.
4. Discuta a importância histórica da descoberta da lei da radiação térmica de Planck na evolução das idéias da Física moderna. Qual o problema que se procurava solucionar na época da descoberta de tal lei? Compare graficamente a distribuição de Planck com a previsão clássica (de Rayleigh-Jeans) e discuta o efeito conhecido como "catástrofe do ultravioleta".

5. Explique como se poderia utilizar o coeficiente angular obtido gráfico de $V_{term} \times T^4$ para a determinação experimental do valor da constante de Stefan-Boltzmann $\sigma$. Quais parâmetros experimentais deveriam ser conhecidos para isso?
6. Explique em que consiste a tensão termoelétrica, na qual se baseia o princípio de operação de uma termopilha.
7. Discuta se a lei do deslocamento de Wien é apropriada para a determinação do comprimento de onda em que ocorre o máximo de radiação emitida (a) pelo sol; (b) por um vaga-lume (emitindo luz amarela); (c) por um laser vermelho; (d) por um LED verde; (e) por uma lâmpada incandescente; (f) por uma lâmpada fluorescente. Nos casos em que a lei de Wien for aplicável, utilize valores razoáveis de comprimentos de onda para estimar as temperaturas correspondentes.
8. Costuma-se dizer que a lâmpada incandescente apresenta uma baixa eficiência porque grande parte do fluxo luminoso emitido não corresponde a luz visível (tipicamente 10% da emissão encontra-se na faixa visível). Explique esse efeito graficamente, esboçando a curva de distribuição espectral de uma lâmpada incandescente típica operando a 3000 K (com máximo da radiância espectral determinado pela lei do deslocamento de Wien) e indicando no gráfico a porção de fluxo correspondente à faixa visível do espetro eletromagnético.
9. Explique como funciona um pirômetro ótico e como ele pode ser usado para a medida de altas temperaturas, onde outros processos diretos de medição não são apropriados.

## BIBLIOGRAFIA


1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Fundamentos de Física, Vols. 3 e 4, LTC, 4ª ed., Rio de Janeiro, 1993.
2. M. W. Zemansky, Calor e Termodinâmica, Ed. Guanabara Dois S. A., Rio de Janeiro, 1978.
3. R. Eisberg, R. Resnick, Física Quântica, Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1979.
4. Laboratory Experiments in Physics, 3.5.01, Phywe Systeme GmbH, Göttingen, 1999.
5. Black body light source for the OS-8539 educational spectrophotometer, Manual de instruções – PASCO Scientific, 1999.
6. F. Reif, Fundamentals of Statistical and Thermal Physics, McGraw Hill, Singapore, 1985.
7. Sérgio M. Rezende, A Física dos Materiais e Dispositivos Eletrônicos. Ed. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1996.
8. F. A. Jenkins, H. White, Fundamentals of Optics, McGraw Hill, Singapore, 1976.
9. J. Goldemberg, Física Geral e Experimental, 3º Vol, Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.
10. D. MacIsaac, G. Kanner, G. Anderson, "Basic physics of the incandescent lamp (lightbulb)", *The Physics Teacher*, Vol. 37, pp. 520-525, 1999.



Redação: Prof. Jair C. C. Freitas

*Grupo ___: _____; _____;_____* *Data: _____*

# FOLHA DE DADOS

**AULA 01:**

*Distribuição espectral da radiação térmica*

Calibração do potenciômetro multivoltas:

| *Ângulo de giro* | $R_{pot}$ (____) (1ª medida) | $R_{pot}$ (____) (2ª medida) | $R_{pot}$ (____) (3ª medida) |
|---|---|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

*Grupo ___: _____;_____;_____* *Data: _____*

Medida da intensidade da radiação emitida pela lâmpada incandescente:

$V_{lamp}$ = _____ ± _____ $I_{lamp}$ = _____ ± _____

| $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

$V_{lamp}$ = _____ ± _____ $I_{lamp}$ = _____ ± _____

| $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

*Grupo ___: _____;_____;_____* *Data: _____*

Medida da intensidade da radiação emitida pela lâmpada incandescente:

$V_{lamp}$ = _____ ± _____ $I_{lamp}$ = _____ ± _____

| $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

$V_{lamp}$ = _____ ± _____ $I_{lamp}$ = _____ ± _____

| $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $R_{pot}$ (___) | $V_{term}$ (___) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

**AULA 02:**

*Lei de Stefan-Boltzmann*

Medida da potência irradiada pela lâmpada sobre a termopilha:

Série 1:

| $V_{lamp}$ (___) | $I_{lamp}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $V_{lamp}$ (___) | $I_{lamp}$ (___) | $V_{term}$ (___) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Série 2:

| $V_{lamp}$ (___) | $I_{lamp}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $V_{lamp}$ (___) | $I_{lamp}$ (___) | $V_{term}$ (___) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Série 3:

| $V_{lamp}$ (___) | $I_{lamp}$ (___) | $V_{term}$ (___) | $V_{lamp}$ (___) | $I_{lamp}$ (___) | $V_{term}$ (___) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Incertezas instrumentais: Tensão:_____ Corrente:_____

*Grupo ___: _____; _____;_____* *Data: _____*

Medida da resistência elétrica da lâmpada à temperatura ambiente:

| Série 1 | | Série 2 | | Série 3 | |
|---|---|---|---|---|---|
| $V_{lamp}$ (___) | $I_{lamp}$ (___) | $V_{lamp}$ (___) | $I_{lamp}$ (___) | $V_{lamp}$ (___) | $I_{lamp}$ (___) |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Resistência elétrica da lâmpada fria (*medida com ohmímetro*):_____

Temperatura ambiente:_____°C

Incertezas instrumentais: Tensão:_____ Corrente:_____